

# Super-Kamiokandeにおける 崩壊電子による $\mu^+/\mu^-$ 識別

名古屋大学 宇宙地球環境研究所

村瀬 美咲

for Super-Kamiokande collaboration

第23回ICEPPシンポジウム 2017.02.21



宇宙地球環境研究所  
Institute for Space-Earth Environmental Research

# 研究目的

- ◆ Super-Kamiokandeにおける大気ニュートリノ振動解析の改良を目指し、既存データの $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ を識別するための解析方法を開発する

$\nu_e / \bar{\nu}_e$ : すでに解析方法が確立されている

$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ : 本研究で解析方法開発

- ◆  $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ を分けるためには、 $\mu^-$ と $\mu^+$ の崩壊時間やエネルギーなどの分布の違いを用いる



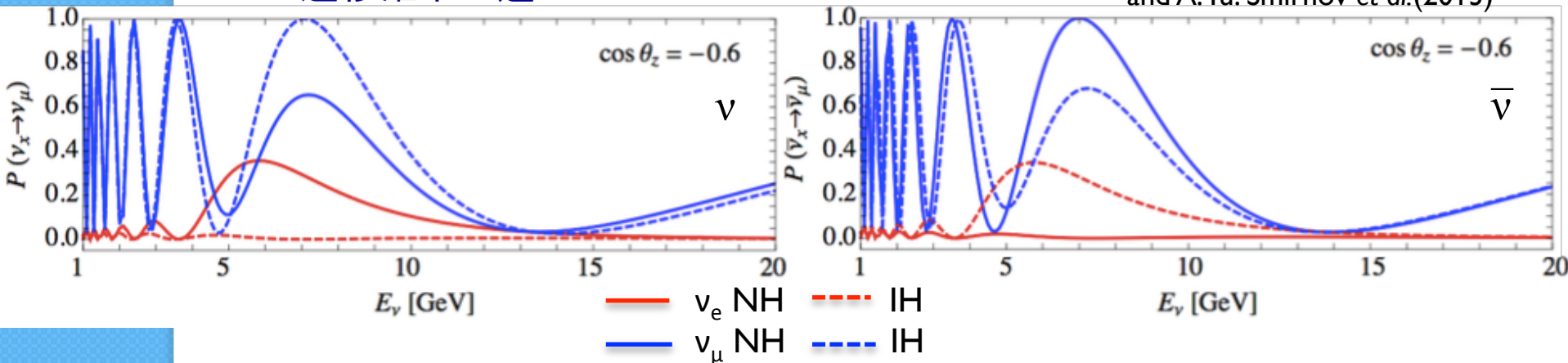
likelihoodにより1イベントごとに識別

# ニュートリノ振動(物質中)

- ニュートリノ振動実験でわかることの1つは $\Delta m^2$ であるが、個々の質量の大小関係はわからない(質量階層性問題)
- 物質効果によりニュートリノ振動は真空中の場合とは変化し、その変化の度合いはニュートリノの質量階層性による
- Normal Hierarchy( $m_1 < m_2 \ll m_3$ )ならニュートリノ、Inverted Hierarchy( $m_3 \ll m_1 < m_2$ )なら反ニュートリノの出現が強められるため、2つで遷移確率は異なる

$\nu$ と $\bar{\nu}$ の遷移確率の違い

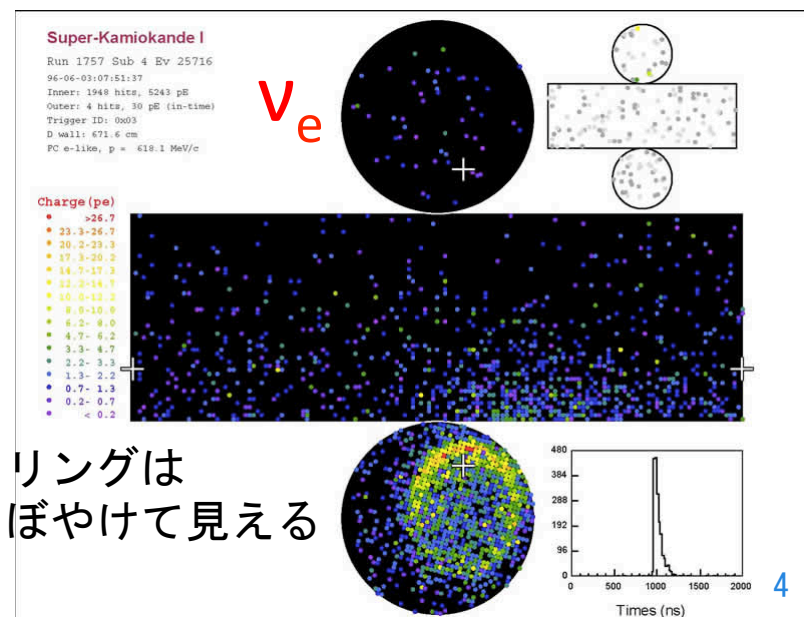
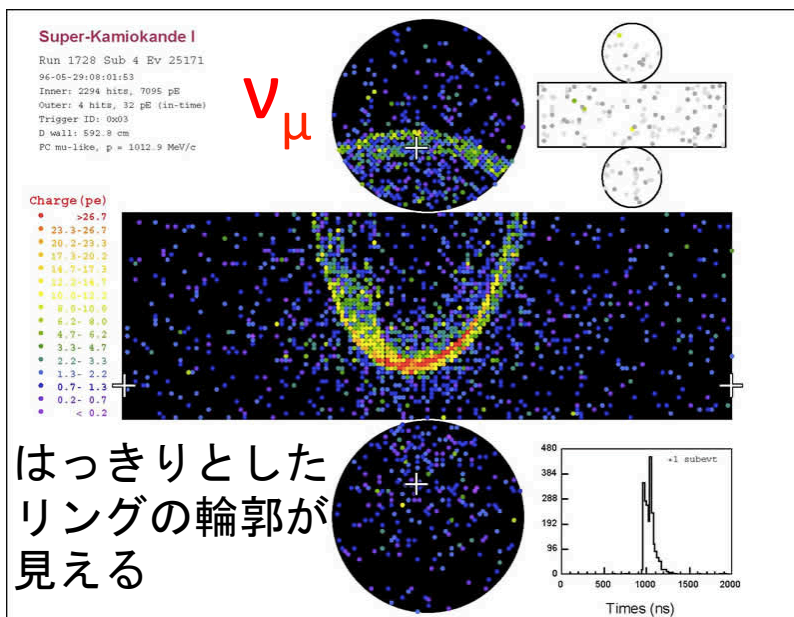
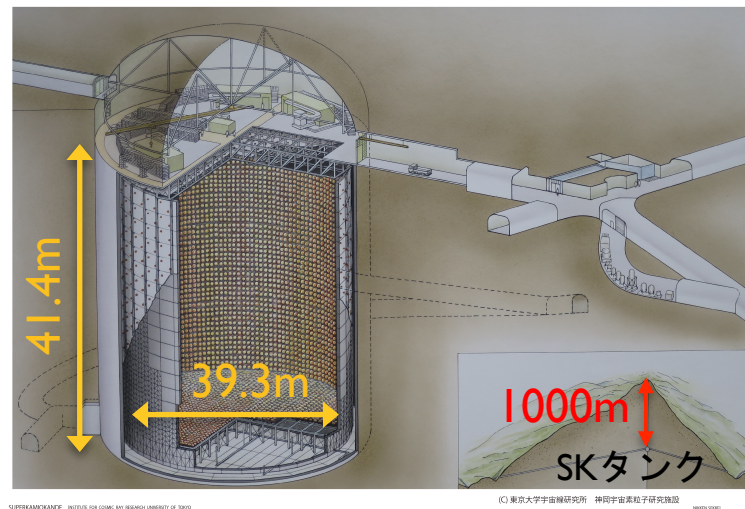
E. Kh. Akhmedov, Soebur Razzaque, and A. Yu. Smirnov et al. (2013)



➡ ニュートリノと反ニュートリノを識別して確率の差を調べることで、質量階層性問題の解決につながる

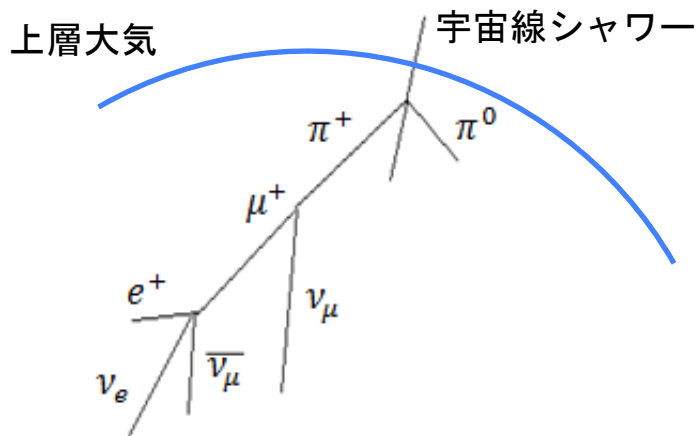
# Super-Kamiokande

- 岐阜県飛騨市の神岡鉱山地下1,000mに位置する水チェレンコフ型検出器
- 直径39.3m、高さ41.4mのタンクに5万トンの超純水
- チェレンコフリングパターンで $\nu_{\mu}(\mu^-)$ と $\nu_e(e^-)$ を識別
- 太陽、大気、加速器、超新星爆発などからのニュートリノを観測

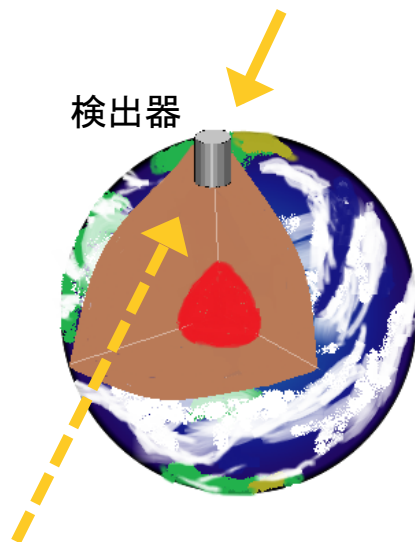
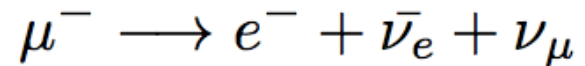
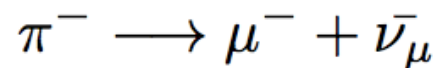
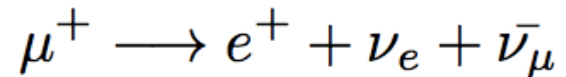
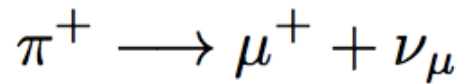




# 大気ニュートリノ



宇宙線が地球の大気と衝突して  
2種類のニュートリノを生成



検出器の上側から来たニュートリノ  
➡そのまま

検出器の下側から来たニュートリノ  
➡地球内部の物質効果を受けた  
**ニュートリノ振動**が起きる

# 解析の流れ

- ①宇宙線  $\mu$  MC/dataを用いて、崩壊電子をタグする手法を確立
- ②大気  $\nu$  MCにおいて、 $\mu^+/\mu^-$  識別likelihoodを計算
  - \*確立したタグ手法を用いて  $\Delta \log \text{likelihood}$  分布を作成
- ③宇宙線  $\mu$  MC/dataにおいても同様にlikelihoodを適用
  - \*基本的な性能を確認
- ④実際に大気  $\nu$  dataにも適用

今回の発表では  
ここまで



Super-Kamiokande大気ニュートリノ振動解析に導入

①宇宙線  $\mu$  MC/dataを用いて、  
崩壊電子をタグする手法を確立

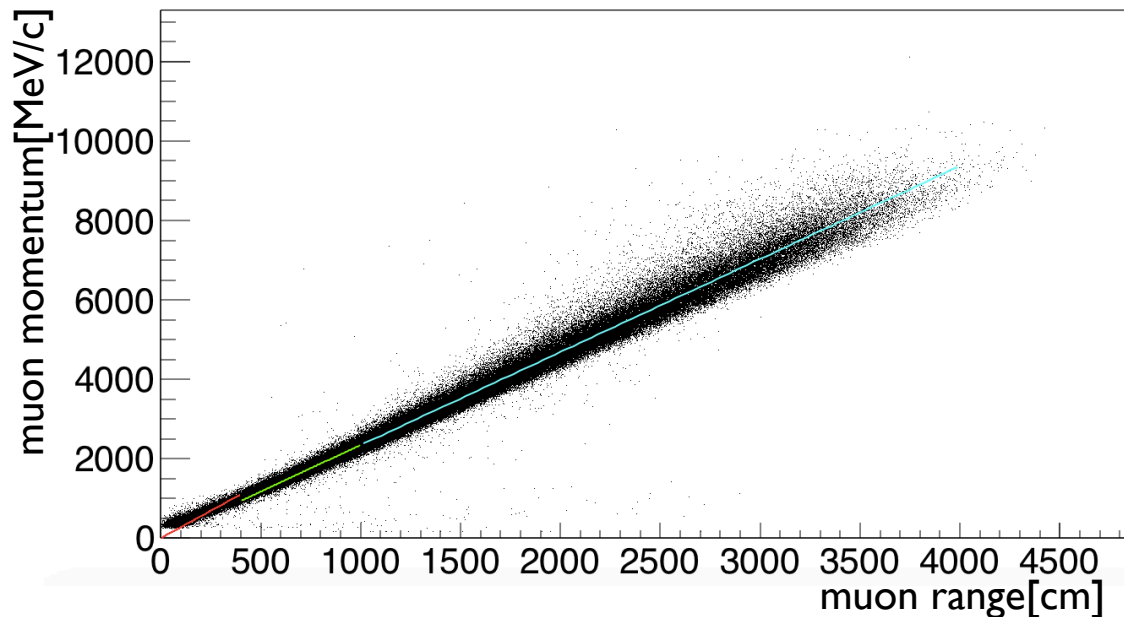
# 宇宙線 $\mu$ での崩壊電子選別

使用するMC/data(dataは2009年4月のものを使用)

\* タンク上部から入射し、タンク内で止まって崩壊電子を出す  
鉛直下向きの**宇宙線ストップミュオン**

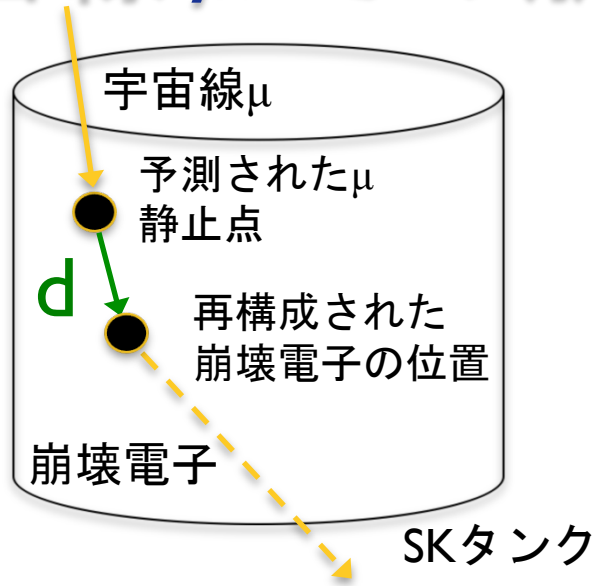
↓  
これを用いて、位置情報から崩壊電子イベントを同定する手法を確立

## ミュオン運動量と飛程の相関図(MCで見積もり)

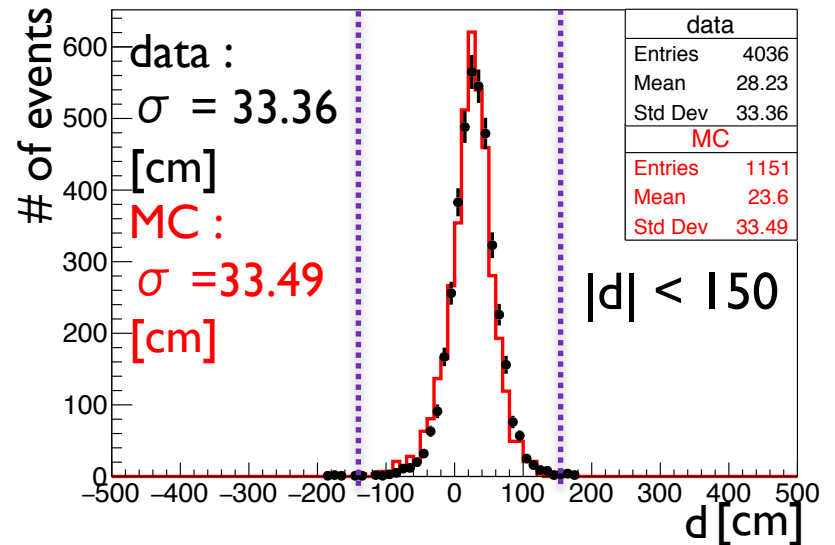


ミュオンの運動量から  
ミュオンの飛程を予測  
(3つの範囲に分け、それぞれフィットして定数を  
決めて計算)

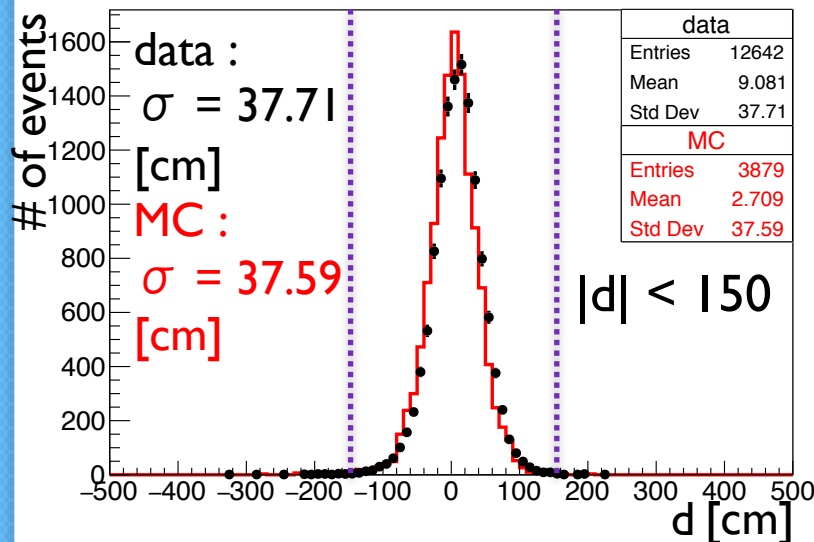
# 宇宙線 $\mu$ での崩壊電子選別



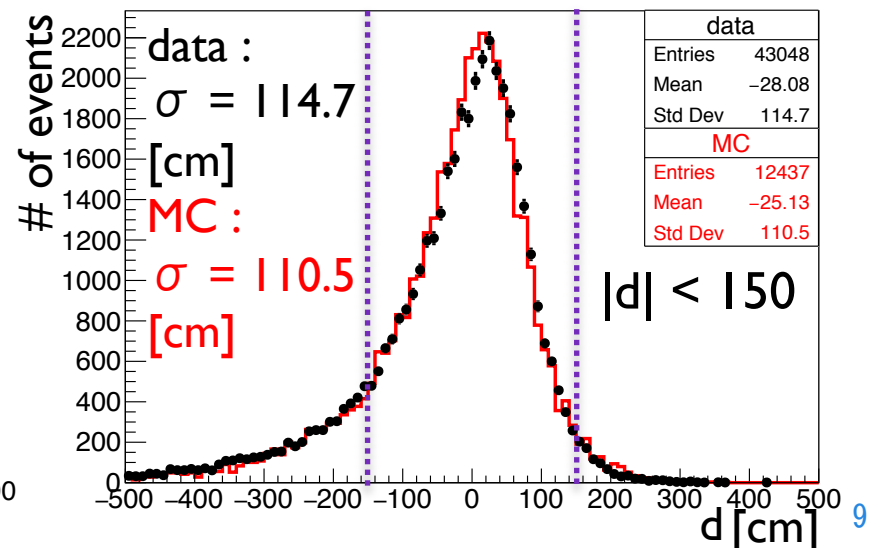
$\mu$  飛程 < 400 [cm]



400 [cm] <  $\mu$  飛程 < 1000 [cm]



$\mu$  飛程 > 1000 [cm]





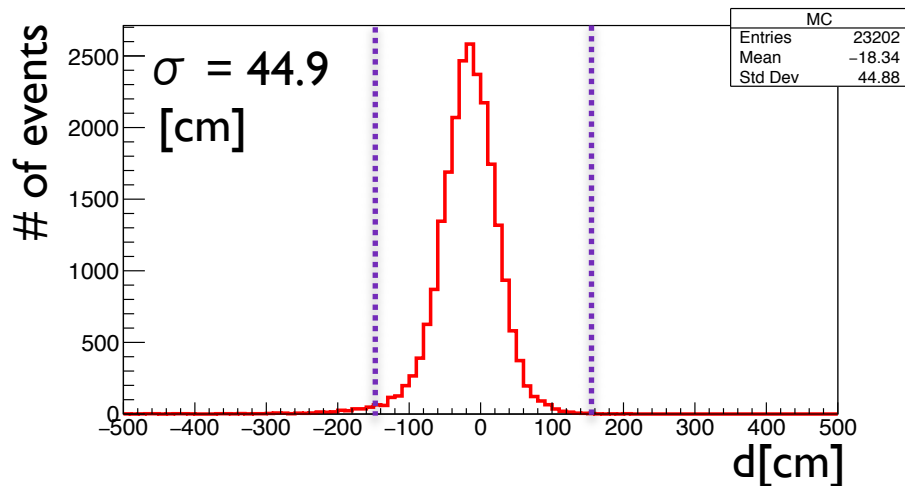
# 大気 $\nu$ MCでの崩壊電子選別

使用するMC

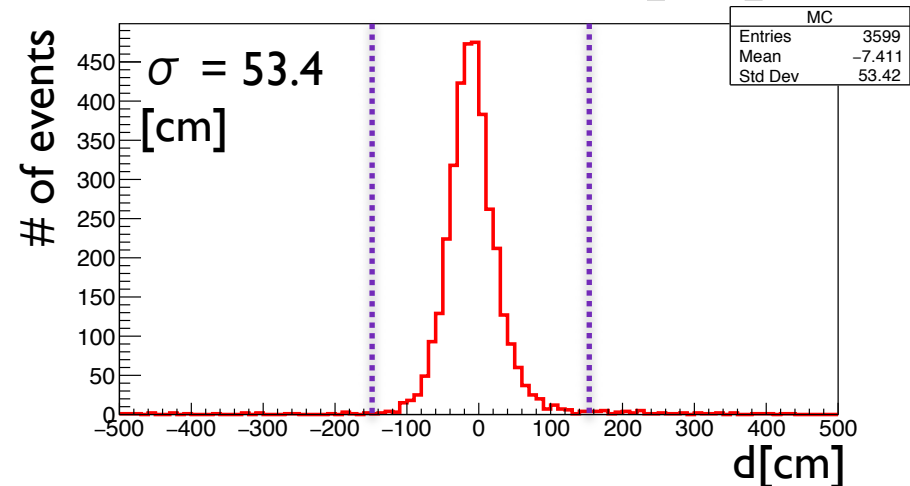
- \* 1リングミュオンの荷電カレント準弾性散乱(CCQE)イベントである大気ニュートリノ

宇宙線ミュオンで定義した選別方法を適用すると...

$0 < \mu \text{ 飛程} < 400 \text{ [cm]}$



$400 < \mu \text{ 飛程} < 1000 \text{ [cm]}$



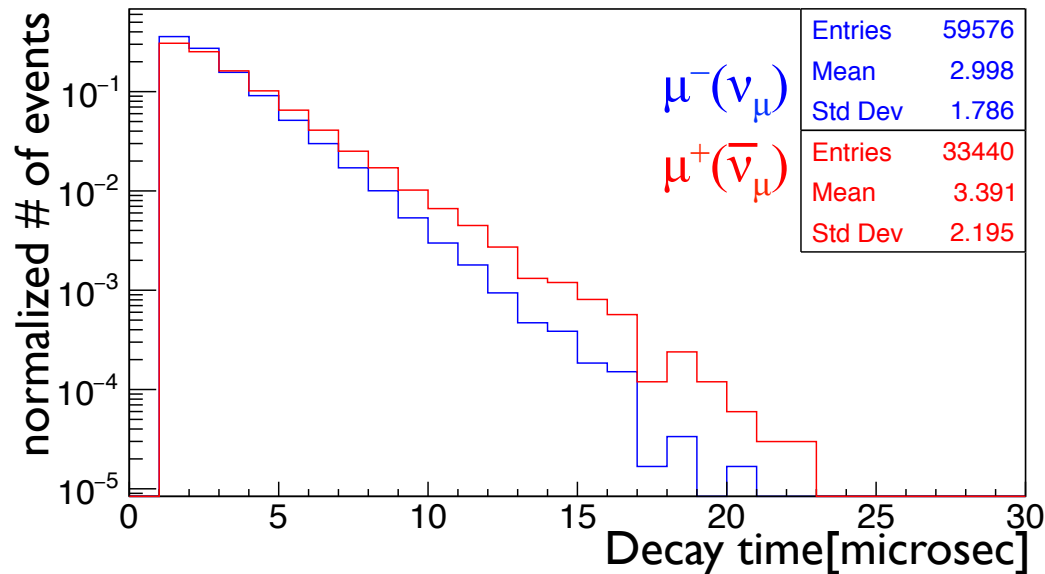
大気 $\nu$ でも同様の方法が使用できることを確認した

②大気  $\nu$  MCにおいて、 $\mu^+ / \mu^-$   
識別likelihoodを計算

# Input parameter確率分布 (大気 $\nu$ MC)

Decay time

縦軸:log scale



\*  $\mu^-$ は原子核に捕獲されるため、  
見かけの崩壊時間が短くなる

$$\mu^- : \tau = 1.7952 \pm 0.0094 \mu\text{s}$$

$$\tau = 1.7954 \pm 0.020 \mu\text{s}$$

T.Suzuki, D.F.Measday, and J.P.Roalsvig et al.(1987)

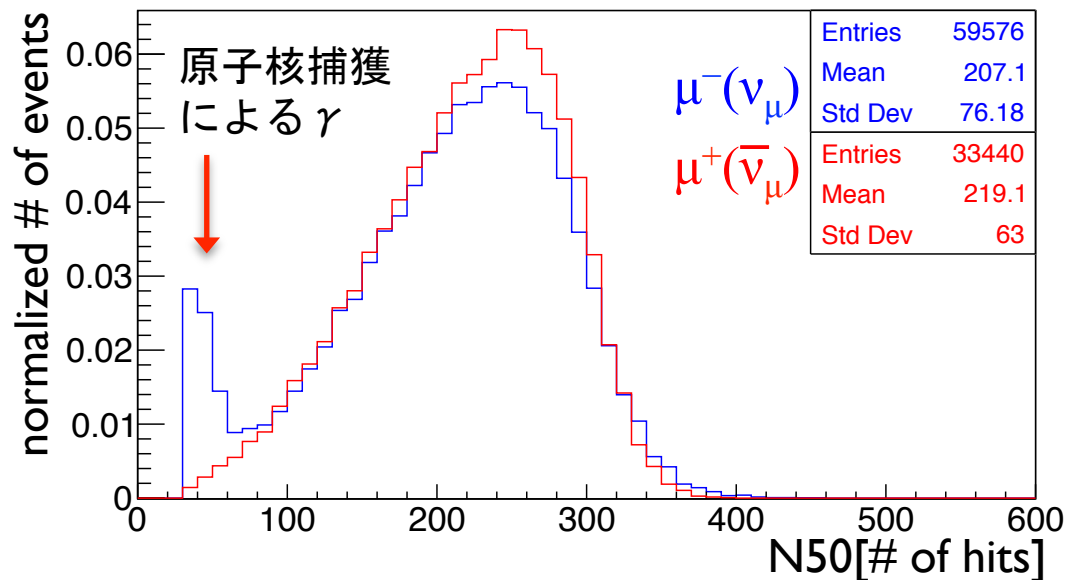
$$\mu^+ : \tau = 2.1913 \pm 0.0158 \mu\text{s}$$

$$\tau = 2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$$

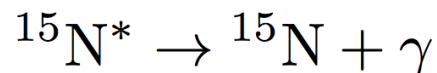
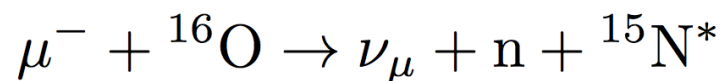
Particle Data Group,J.J.Hernandez et al.(1990)

# Input parameter 確率分布 (大気 $\nu$ MC)

N50(50ns sliding timing window内の最大hit PMT数)



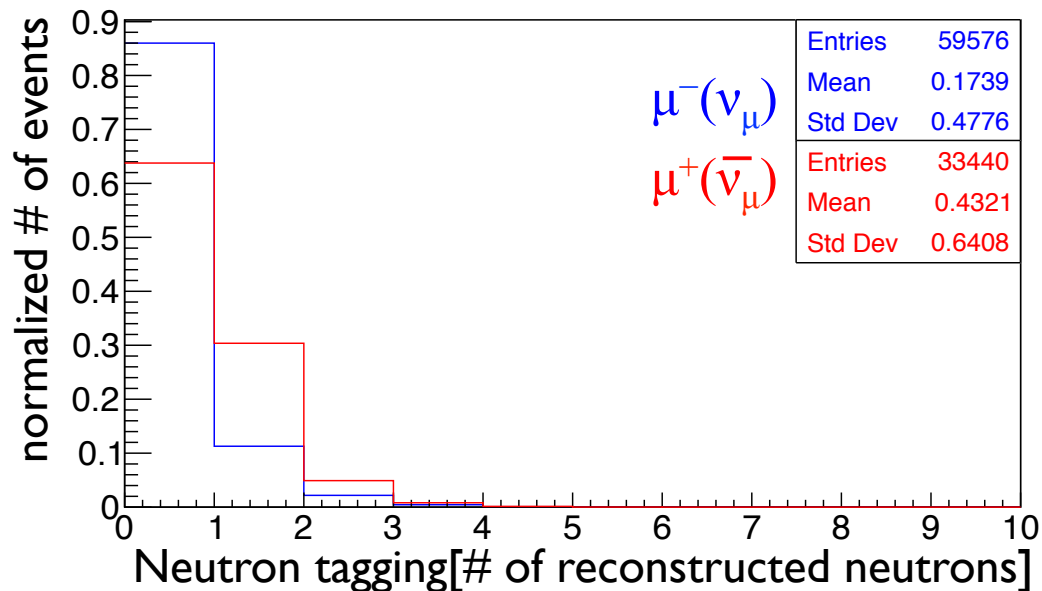
\*  $\mu^-$ は原子核捕獲による  $\gamma$  を放出することがある



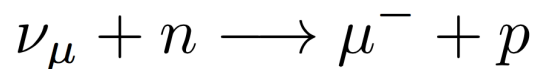
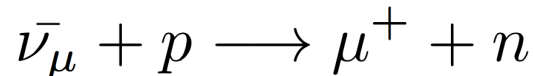
\* N50分布の形はエネルギー分布の形とほぼ同じ

# Input parameter 確率分布 (大気 $\nu$ MC)

## Neutron tagging



- \* 崩壊電子は関係ないが、両者の差がはっきりしていて使えそうということで追加
- \* CCQEイベントでは $\mu^+$ のほうが中性子を放出する





# log likelihood差分布 (大気 $\nu$ )

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like  
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

大気ニュートリノMC  
 (計500年分)  
 300年分  $\Rightarrow$  MC  
 200年分  $\Rightarrow$  Fake data

$\mu^+$ か $\mu^-$ か既知のMCを用いて、  
 どの程度分けられるか調べる

$$P^{\mu^-} = P^{\mu^-}(\text{decay time}) \times P^{\mu^-}(\text{N50}) \times P^{\mu^-}(\text{N tag})$$

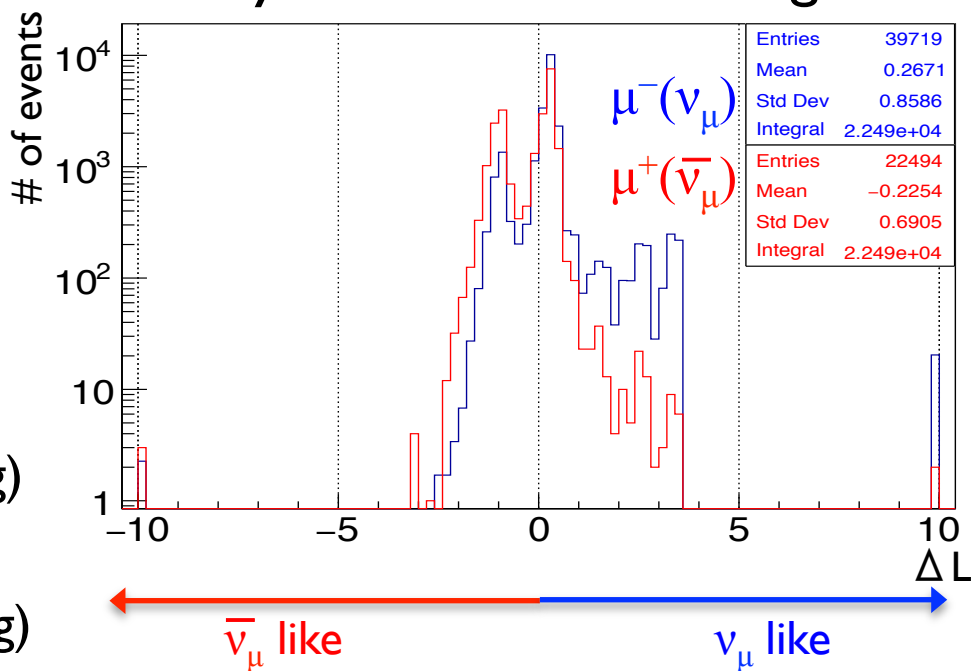
$$P^{\mu^+} = P^{\mu^+}(\text{decay time}) \times P^{\mu^+}(\text{N50}) \times P^{\mu^+}(\text{N tag})$$

$$\Delta L = \log P^{\mu^-} - \log P^{\mu^+}$$

※ $P^{\mu^+} = 0$  なら  $\Delta L = 10$ 、 $P^{\mu^-} = 0$  なら  $\Delta L = -10$ 、  
 両方とも0ならそのイベントは使用しない  
 とする

# of  $\nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \bar{\nu}_\mu / \# \text{ of } \nu_\mu)$

Decay time  $\times$  N50  $\times$  N tag



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.800 \pm 0.003$   
 purity =  $0.592 \pm 0.003$   
 $\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.448 \pm 0.003$   
 purity =  $0.692 \pm 0.004$

縦軸: log scale

# まとめ

- 物質効果を受けたニュートリノ振動の遷移確率の差を調べるために、Super-Kamiokandeのデータにおいて $\mu^- / \mu^+$ 識別をすることによって $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ 識別する方法の開発をおこなっている
- 宇宙線ストップミュオンを用いて、位置情報から崩壊電子イベントを同定する手法を確立した
- 崩壊電子の情報を用いて崩壊時間、エネルギー(N50)、さらに中性子数の分布を加え、likelihoodによって $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ 識別をした
- 今後、この手法を大気ニュートリノ振動解析に適用する



# Back Up

# ニュートリノ振動

遷移確率(真空中)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m_{32}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right)$$

物質中では...

$$\sin^2 2\theta_{13}^m = \frac{\sin^2 2\theta_{13}}{\underbrace{(A/\Delta m_{32}^2 - \cos 2\theta_{13})^2 + \sin^2 2\theta_{13}}}$$

Normal Hierarchy : +

Inverted Hierarchy : -

ここで、 $A = 2\sqrt{2}G_F N_e E_\nu$

$G_F$  : フェルミ定数

$N_e$  : 物質中の電子数密度

# $\nu_e / \bar{\nu}_e$ 識別 (multi-GeV electron-like events)

✧ 1 リングなら

ミューオン崩壊により遅れた信号の数  $N_{\text{dcy}}$

$N_{\text{dcy}} > 0 \Rightarrow \nu_e$  like

$N_{\text{dcy}} = 0 \Rightarrow \bar{\nu}_e$  like

✧ 複数リングなら

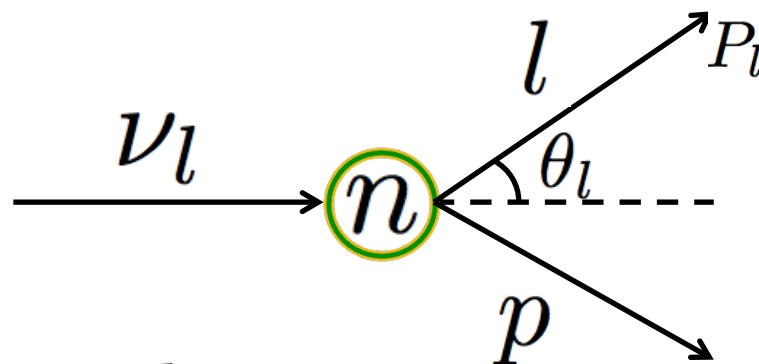
- ・ 崩壊電子イベントの数
- ・ チェレンコフリングの数
- ・ 再構成された横成分の運動量

を用いて log likelihood を計算

※これらの方法は  $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$  識別においては不十分のため、使われていない



# 荷電カレント準弾性散乱(CCQE)



$$\nu_l + n \longrightarrow l + p$$

終状態の荷電レプトン( $l$ )の運動量と方向から、  
ニュートリノのエネルギーを再構成することができる

$$E_\nu^{rec} = \frac{m_n E_l - m_l^2/2}{m_n - E_l + P_l \cos\theta_l}$$

# Basic event selection

## 宇宙線 ミュオン

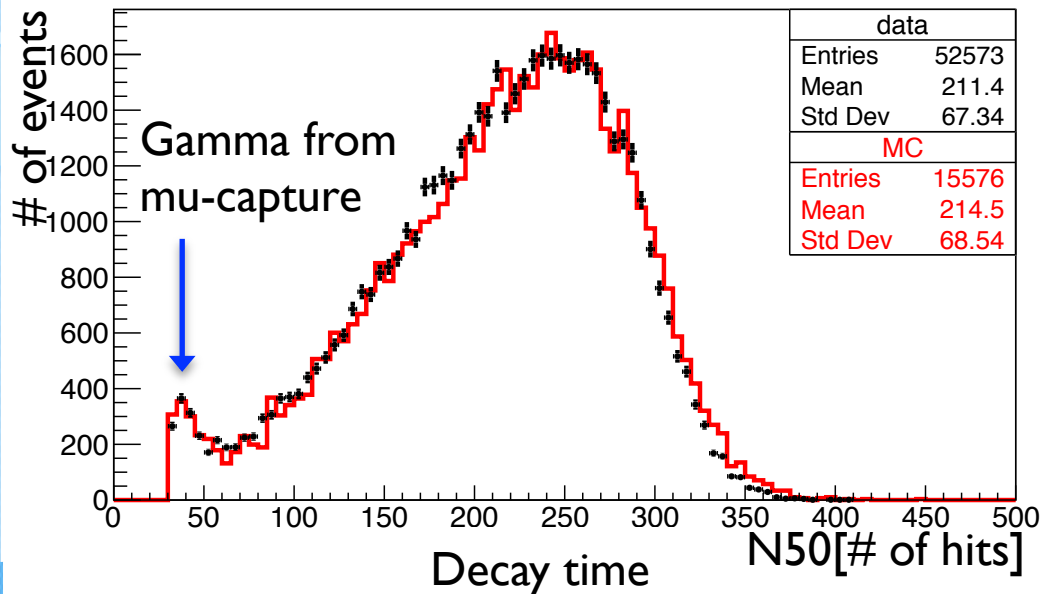
- $\mu$  崩壊時間  $> 1.2$  [micro sec]
- $\mu$  総電荷  $> 1000$  [p.e.]
- $1.5 < \mu$  運動量/ $\mu$  飛程  $< 3.5$  [MeV/c/cm]
- 鉛直下向き  $\mu$
- $\mu$  fitの良さ  $> 0.5$  (Max : 1)
- 崩壊電子の数 = 1
- 崩壊電子の種類 = sub event
- e fit (Bonsai) の良さ  $> 0.5$  (Max : 1)
- 壁際イベント除去

## 大気 ニュートリノ

- $\mu$  崩壊時間  $> 1.2$  [micro sec]
- $\mu$  総電荷  $> 1000$  [p.e.]
- 壁からの $\mu$ の距離  $\geq 200$  [cm]
- $\mu$  またはe like のタイプ =  $\mu$
- 崩壊電子の数 = 1
- 崩壊電子の種類 = sub event
- e fit (Kai) の良さ  $> 0.5$  (Max : 1)
- visible energy  $> 30$  [MeV]
- 外側のタンクでのヒット数  $\leq 15$  [hits]
- リングの数 = 1
- 家電カレント準弾性散乱イベント選択
- 壁際イベント除去

# MCでのInput parameter分布(宇宙線 $\mu$ )

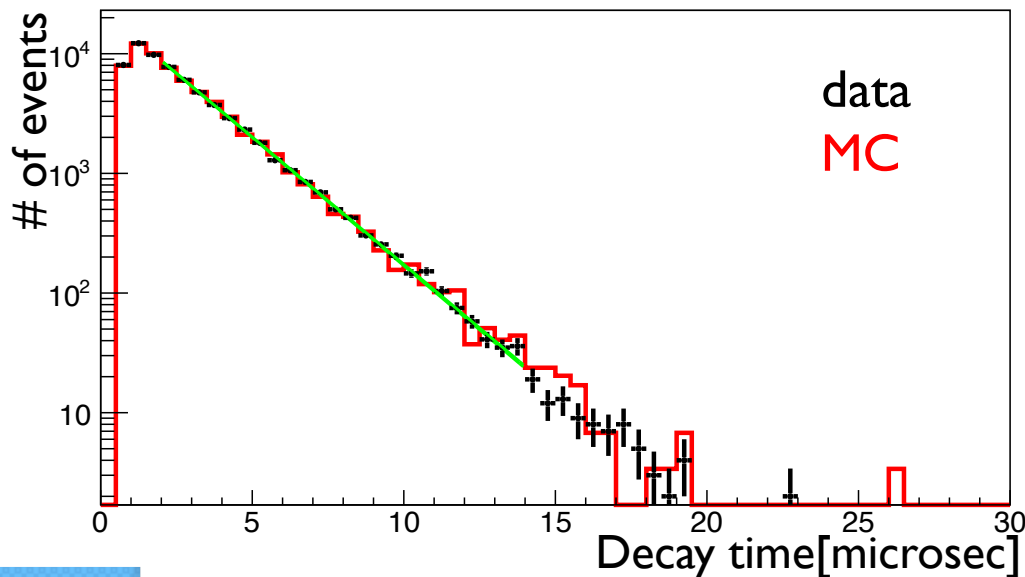
N50



MC / data = 1.013  
(Mean value)

MC/dataでよく  
一致している

Fit range : 1.2~12[microsec]



data	
Entries	65716
Mean	2.781
Std Dev	2.062
$\chi^2 / \text{ndf}$	28.76 / 20
p0	$2.283\text{e}+04 \pm 1.780\text{e}+02$
p1	$2.057 \pm 0.009$

(data)

$$\tau = 2.057 \pm 0.009 \mu\text{s}$$

MC	
Entries	19368
Mean	2.781
Std Dev	2.059
$\chi^2 / \text{ndf}$	99.98 / 20
p0	$2.309\text{e}+04 \pm 1.791\text{e}+02$
p1	$2.042 \pm 0.009$

(MC)

$$\tau = 2.042 \pm 0.009 \mu\text{s}$$

# $\mu^+ / \mu^-$ 識別 likelihood 計算方法

Input parameterの分布をもとに、それぞれの値に対して  $v_\mu \cdot \bar{v}_\mu$  である確率を計算

手順 分布がnormalizeされているので、  
値の含まれるbinのイベント数=確率となる



MCにおいて  
input parameter  
分布( $\mu^+$ と $\mu^-$ 別)  
を作成

1イベントごと  
にFake dataの値  
を読み、その値  
を含むbinをとる  
確率を求める

他のparameter  
に対しても同様  
に確率を求めて  
掛け合わせる

$\mu^-$ と $\mu^+$ それぞれ  
において求め、  
logをとったもの  
の差を調べる

$$P^{\mu^-} = P^{\mu^-}(\text{decay time}) \times P^{\mu^-}(\text{N50}) \times P^{\mu^-}(\text{neutron tagging})$$

$$P^{\mu^+} = P^{\mu^+}(\text{decay time}) \times P^{\mu^+}(\text{N50}) \times P^{\mu^+}(\text{neutron tagging})$$

$$\Delta L = \log P^{\mu^-} - \log P^{\mu^+}$$

$$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(v_\mu)\text{like}$$

$$\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{v}_\mu)\text{like}$$

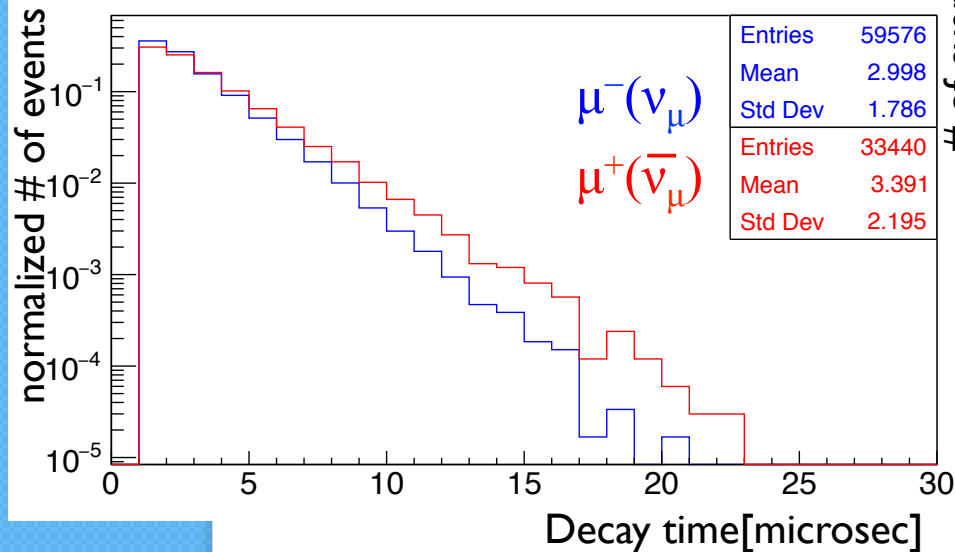
※もし  $P^{\mu^+} = 0$  なら  $\Delta L = 10$ 、 $P^{\mu^-} = 0$  なら  $\Delta L = -10$ 、  
両方とも0ならそのイベントは使用しない とする

# Decay time (大気 $\nu$ )

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like  
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

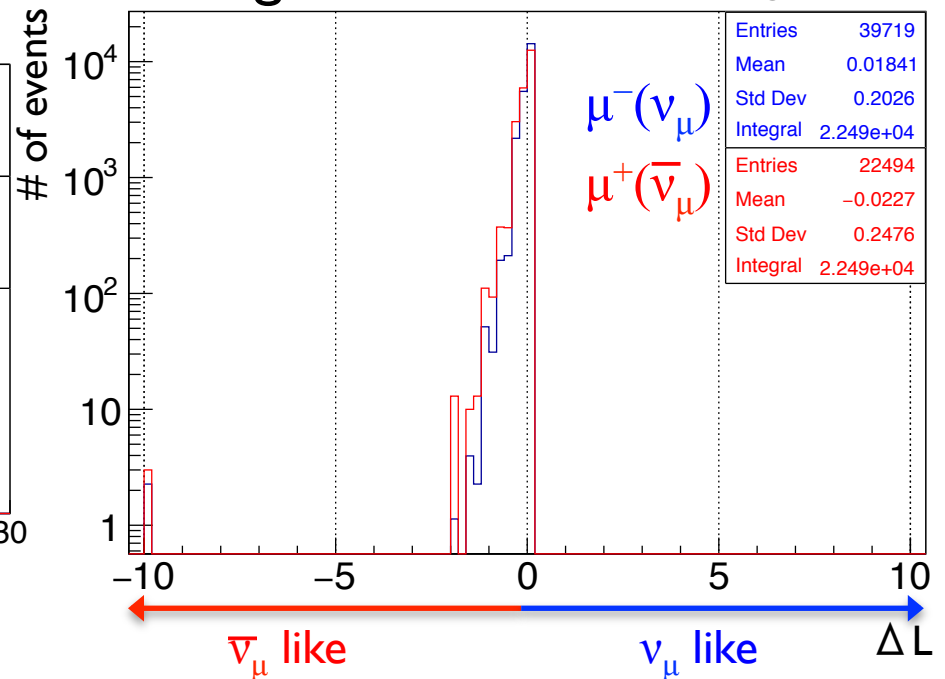
Input parameter

縦軸: log scale



$\Delta \log$  likelihood

縦軸: log scale



$$\nu_\mu \text{ efficiency} = 0.635 \pm 0.003$$

$$\text{purity} = 0.532 \pm 0.003$$

$$\bar{\nu}_\mu \text{ efficiency} = 0.443 \pm 0.003$$

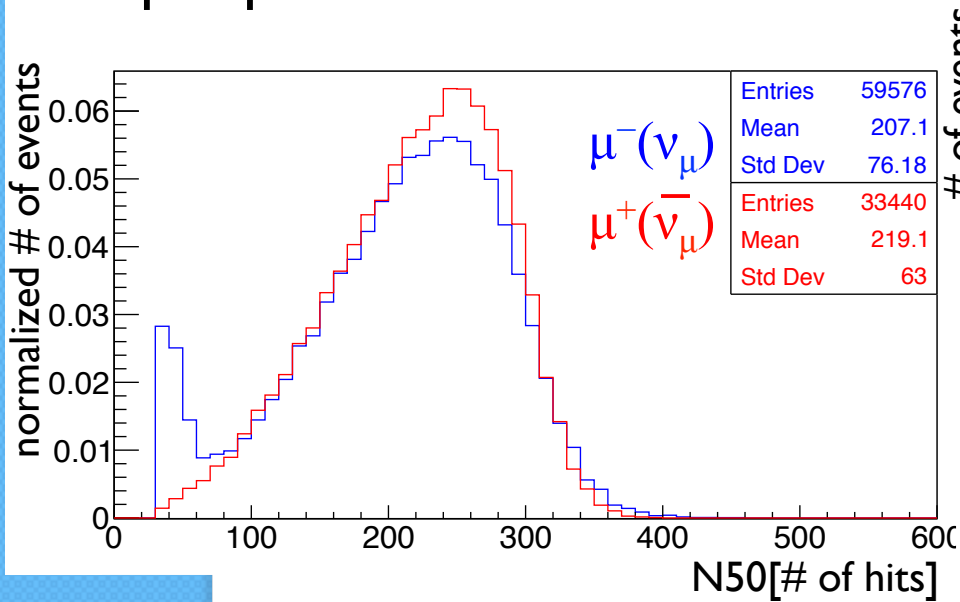
$$\text{purity} = 0.548 \pm 0.004$$

$$\# \text{ of } \nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \nu_\mu / \# \text{ of } \bar{\nu}_\mu)$$

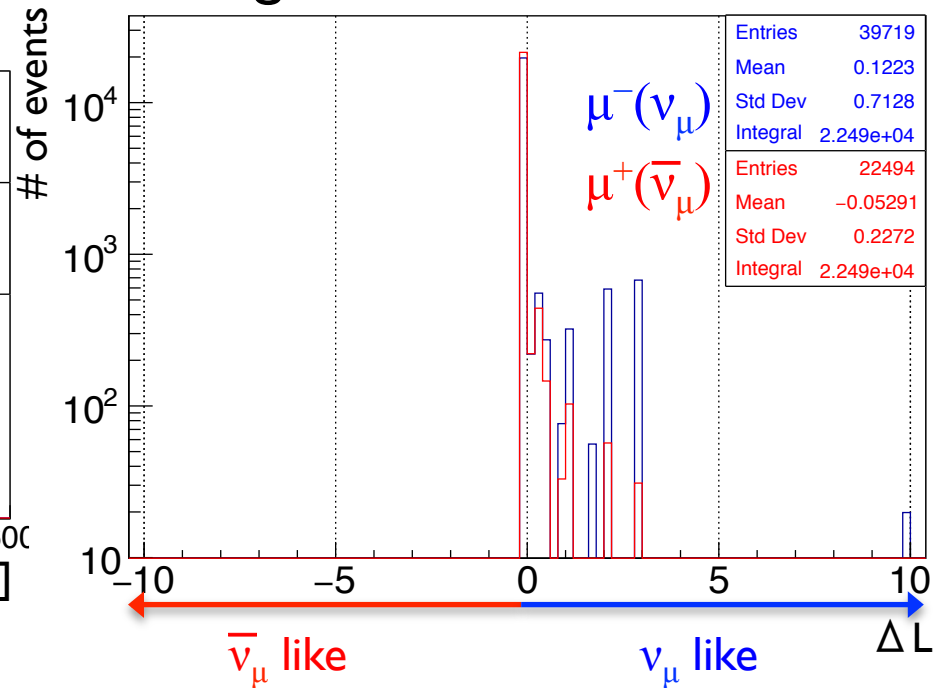
# N50 (大気 $\nu$ )

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like  
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

## Input parameter



## $\Delta \log$ likelihood 縦軸: log scale



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.124 \pm 0.002$

purity =  $0.728 \pm 0.007$

$\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.954 \pm 0.001$

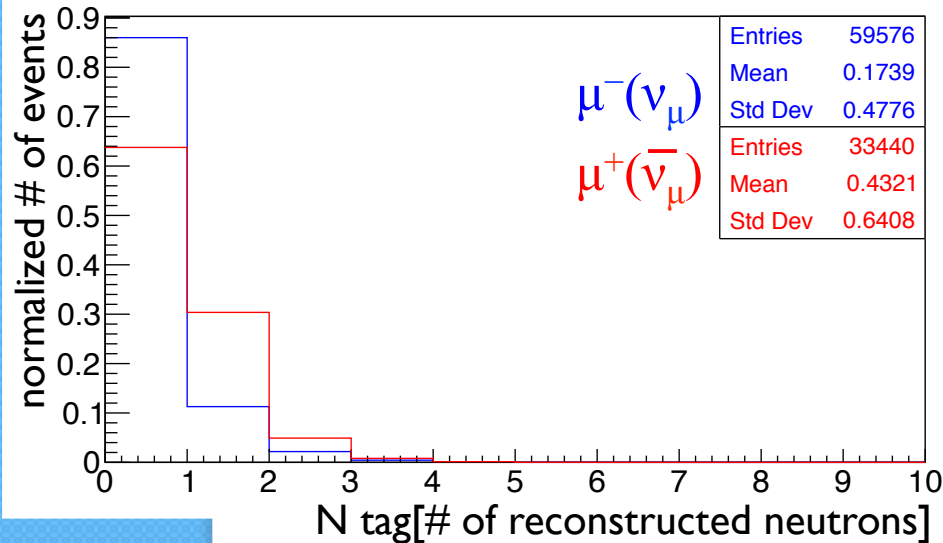
purity =  $0.521 \pm 0.003$

# of  $\nu_\mu \Rightarrow \times$  (# of  $\nu_\mu$  / # of  $\bar{\nu}_\mu$ )

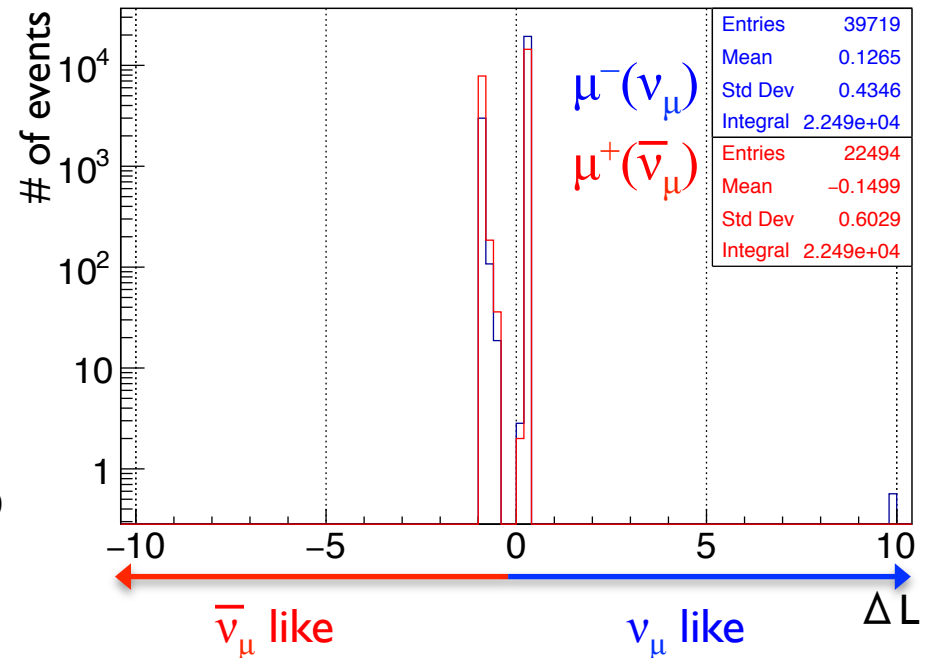
# Neutron tagging (大気 $\nu$ )

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like  
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

Input parameter



$\Delta \log$  likelihood 縦軸: log scale



$$\nu_\mu \text{ efficiency} = 0.861 \pm 0.002$$

$$\text{purity} = 0.573 \pm 0.003$$

$$\bar{\nu}_\mu \text{ efficiency} = 0.358 \pm 0.003$$

$$\text{purity} = 0.721 \pm 0.004$$

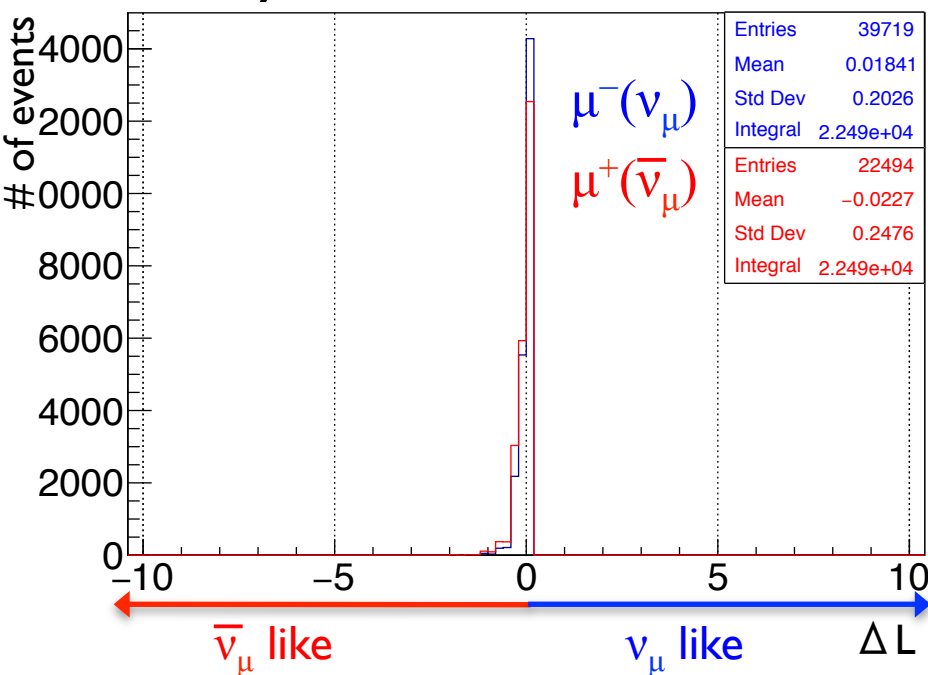
$$\# \text{ of } \nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \nu_\mu / \# \text{ of } \bar{\nu}_\mu)$$

# log likelihood 差分布 (大気 $\nu$ ) not log scale

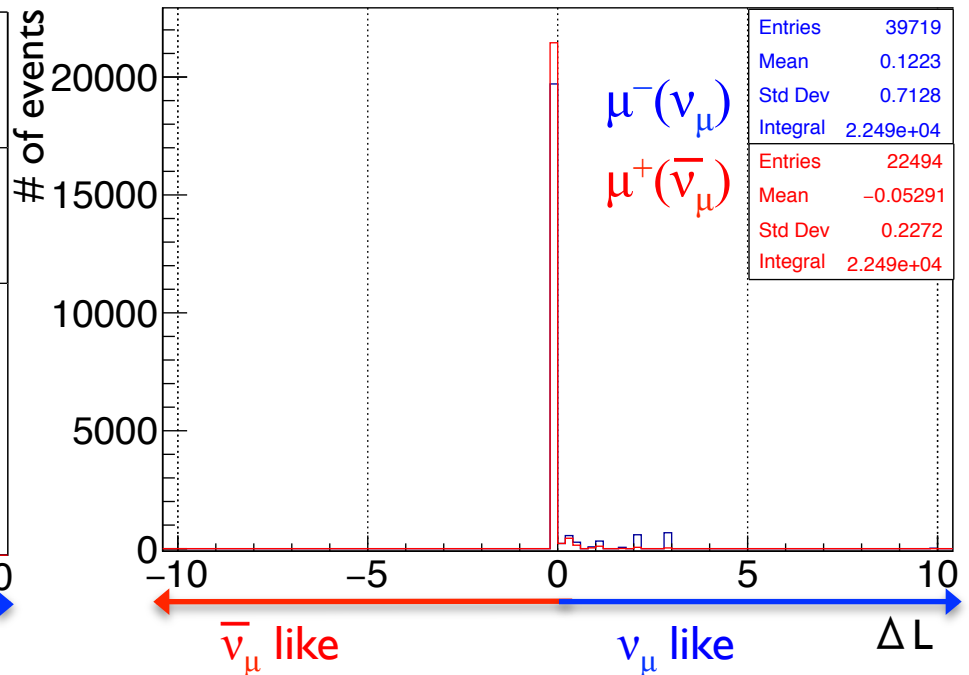
$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like  
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

Decay time

N50



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.635 \pm 0.003$   
 purity =  $0.532 \pm 0.003$   
 $\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.443 \pm 0.003$   
 purity =  $0.548 \pm 0.004$



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.124 \pm 0.002$   
 purity =  $0.728 \pm 0.007$   
 $\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.954 \pm 0.001$   
 purity =  $0.521 \pm 0.003$

# of  $\nu_\mu \Rightarrow \times (\# \text{ of } \bar{\nu}_\mu / \# \text{ of } \nu_\mu)$



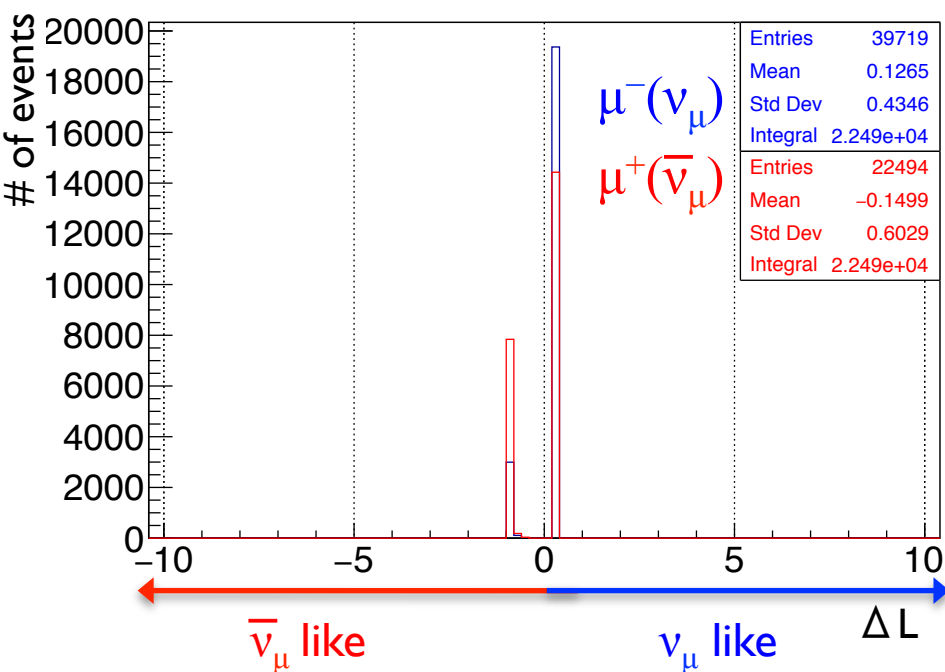
# log likelihood 差分布

(大気  $\nu$ ) not log scale

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like

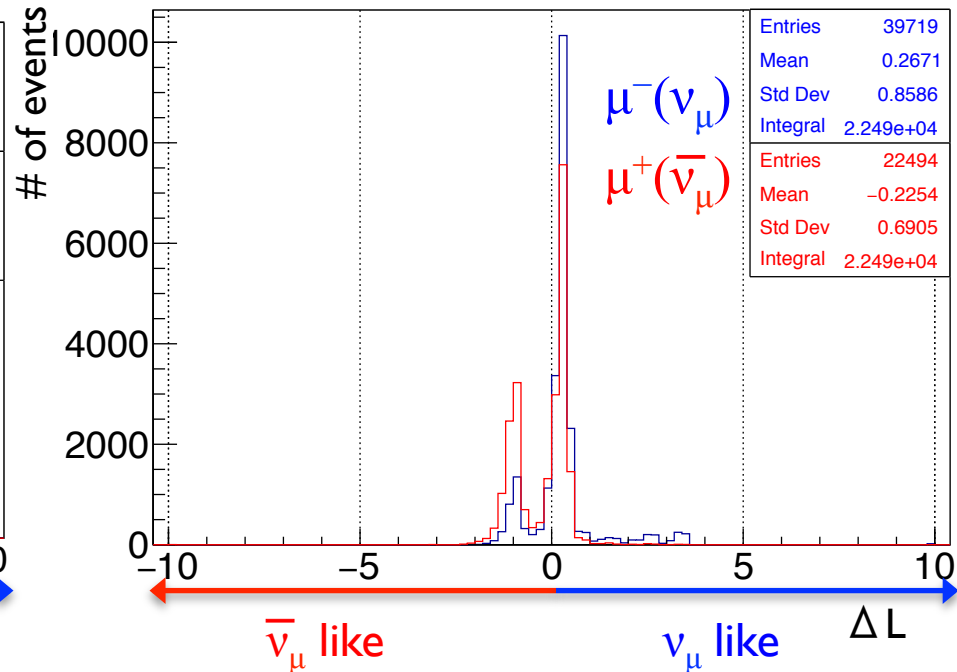
$\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

Neutron tagging



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.861 \pm 0.002$   
 purity =  $0.573 \pm 0.003$   
 $\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.358 \pm 0.003$   
 purity =  $0.721 \pm 0.004$

Decay time  $\times$  N50  $\times$  N tag



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.800 \pm 0.003$   
 purity =  $0.592 \pm 0.003$   
 $\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.448 \pm 0.003$   
 purity =  $0.692 \pm 0.004$

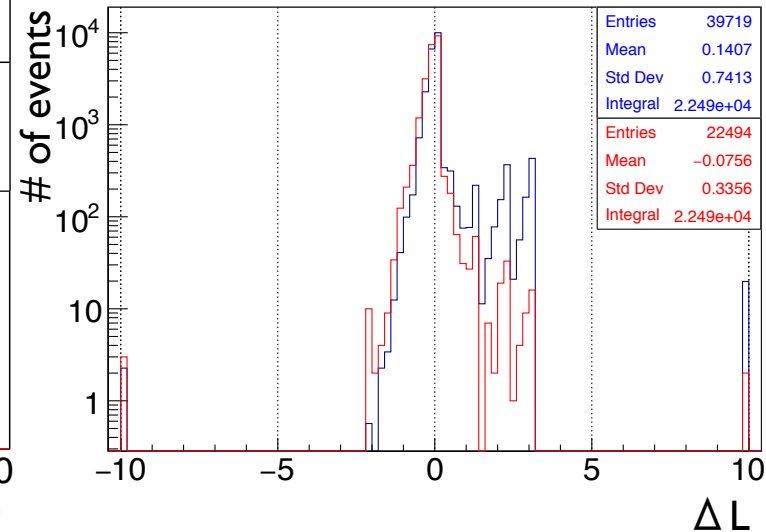
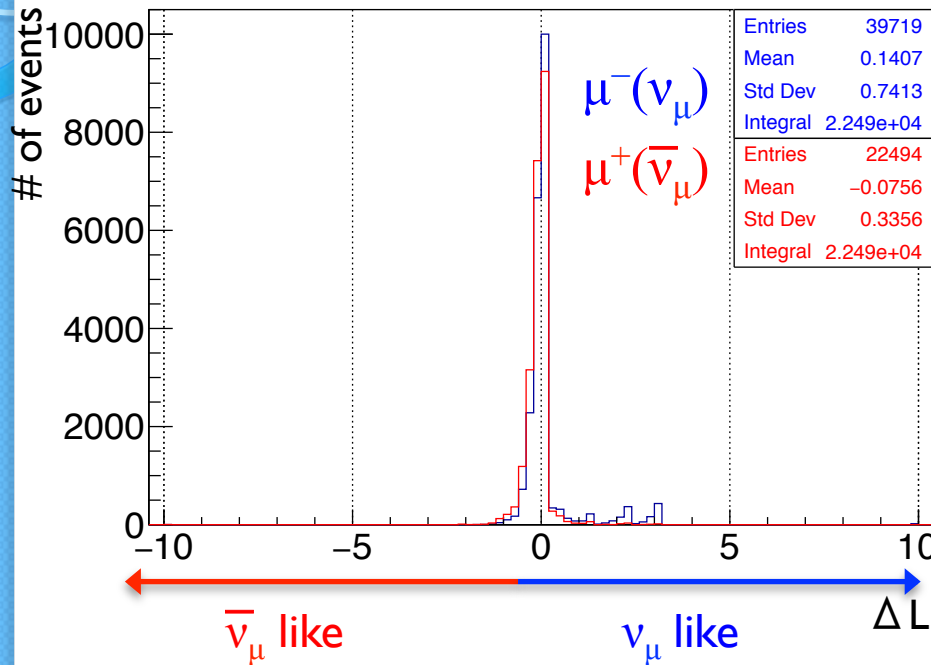
# of  $\nu_\mu \Rightarrow \times$  (# of  $\bar{\nu}_\mu$  / # of  $\nu_\mu$ )

# log likelihood差分布 (大気 $\nu$ )

Decay time  $\times$  N50

$\Delta L > 0 \Rightarrow \mu^-(\nu_\mu)$  like  
 $\Delta L < 0 \Rightarrow \mu^+(\bar{\nu}_\mu)$  like

縦軸: log scale



$\nu_\mu$  efficiency =  $0.555 \pm 0.003$   
 purity =  $0.556 \pm 0.003$   
 $\bar{\nu}_\mu$  efficiency =  $0.557 \pm 0.003$   
 purity =  $0.556 \pm 0.003$

# of  $\nu_\mu \Rightarrow \times$  (# of  $\bar{\nu}_\mu$  / # of  $\nu_\mu$ )